

# Just-in-time

Toon Nolten



# JIT

- Combineert interpretatie en AOT compilatie
- Snelheid van gecompileerde code
- Flexibiliteit van geïnterpreteerde code (bvb. platform onafhankelijk)
- Overhead van interpretatie
- Overhead van compilatie

# Java

## HotSpot Performance Engine

- Gecompileerd naar bytecode (platform onafhankelijk)
- Bytecode initieel geïnterpreteerd
- Per methode wordt beslist om te compileren
- *Client* en *Server* VM's

# Python

- Dynamische taal
- AOT compilatie is niet altijd mogelijk
- (Wel mogelijk voor RPython)

# PyPy

- Meta tracing JIT
- Per trace wordt beslist om te compileren
- Niet het programma maar de interpreter wordt getraced
- Laat toe andere talen gebruik te laten maken van de JIT
  - Prolog
  - Smalltalk
  - JavaScript
  - Scheme
  - Ruby
  - PHP

# Just-in-time

## Register Allocatie

- Intermediate Representation: oneindig veel *temporaries*
- Processor: beperkt aantal registers ( $k$ )
- Elke temporary moet toegewezen worden aan een register of het geheugen
- *Registers zijn veel sneller*

# Register Allocatie

- Liveness analyse: waarden die live zijn moeten ergens opgeslagen worden
- Interference graph: waarden die interfereren (tegelijk live zijn) moeten op verschillende plaatsen opgeslagen worden
- k-kleuring van grafen is te traag voor just-in-time compilatie

# Linear Scan

- Geef alle instructies uit de IR een nummer
- De volgorde maakt niet uit (zelfde als in de IR van het programma, diepte-eerst) , zolang de ordening totaal is
- Voor liveness een ruwe benadering: wat is het eerste en laatste moment dat de waarde live is?

Dit geeft een *live interval* voor elke temporary



# Linear Scan

## Algoritme

- Sorteer de live intervallen op beginwaarde
- Aantal benodigde registers verandert alleen wanneer een live interval begint of eindigt
- Gebruik een *greedy strategie* om registers toe te wijzen

# Linear Scan

## LinearScanRegisterAllocation

```
active ← {}  
foreach live interval i, in order of increasing start point  
    ExpireOldIntervals(i)  
    if length(active) = k then  
        SpillAtInterval(i)  
    else  
        register[i] ← a register removed from pool of  
                        free registers  
        add i to active, sorted by increasing end point
```

## ExpireOldIntervals(*i*)

```
foreach interval j in active, in order of increasing end point  
    if endpoint[j] ≥ startpoint[i] then  
        return  
    remove j from active  
    add register[j] to pool of free registers
```

## SpillAtInterval(*i*)

```
spill ← last interval in active
```

```
if endpoint[spill] > endpoint[i] then  
    register[i] ← register[spill]  
    location[spill] ← new stack location  
    remove spill from active  
    add i to active, sorted by increasing end point  
else  
    location[i] ← new stack location
```

# Voorbeeld $k = 3$

## LinearScanRegisterAllocation

$$active \leftarrow \{\}$$

**foreach** live interval  $i$ , in order of increasing start point

## ExpireOldIntervals(*i*)

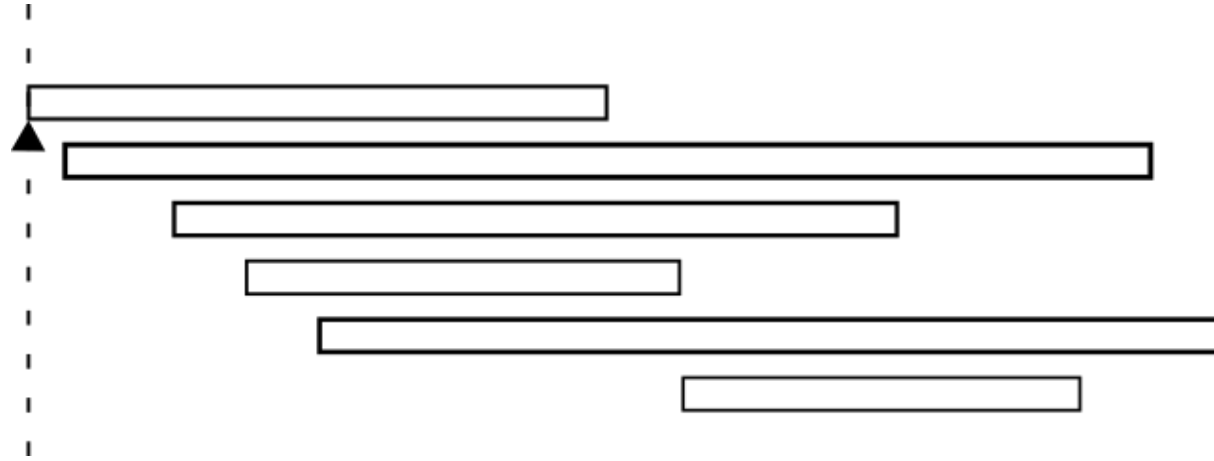
**if** length(*active*) = *k* **then**

## SpillAtInterval(*i*)

**else**

```
register[i] ← a register removed from pool of  
free registers
```

add  $i$  to *active*, sorted by increasing end point



# Voorbeeld $k = 3$

## LinearScanRegisterAllocation

$$active \leftarrow \{\}$$

**foreach** live interval  $i$ , in order of increasing start point

## ExpireOldIntervals(*i*)

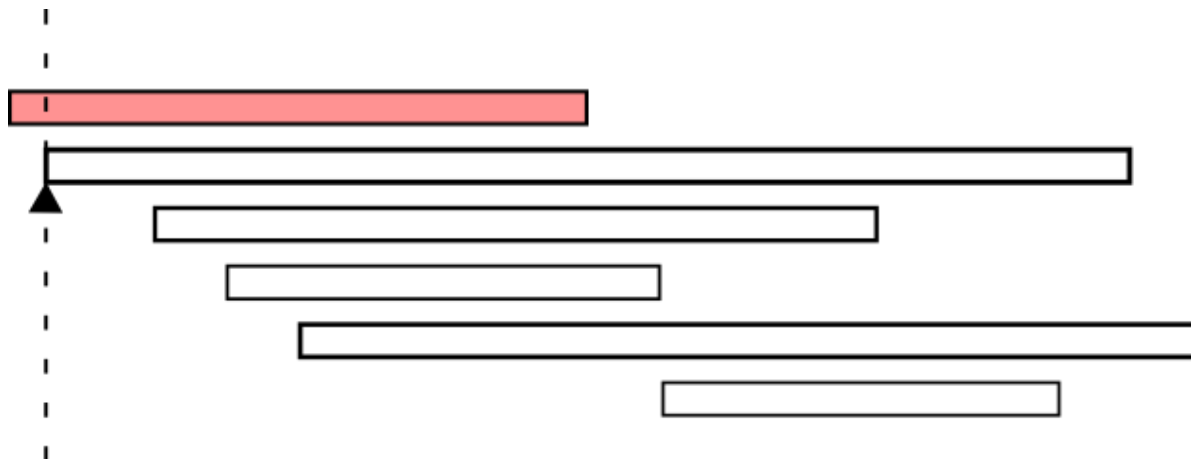
**if** length(*active*) = *k* **then**

## SpillAtInterval(*i*)

**else**

```
register[i] ← a register removed from pool of  
free registers
```

add  $i$  to *active*, sorted by increasing end point



# Voorbeeld $k = 3$

## LinearScanRegisterAllocation

$$active \leftarrow \{\}$$

**foreach** live interval  $i$ , in order of increasing start point

## ExpireOldIntervals(*i*)

**if** length(*active*) = *k* **then**

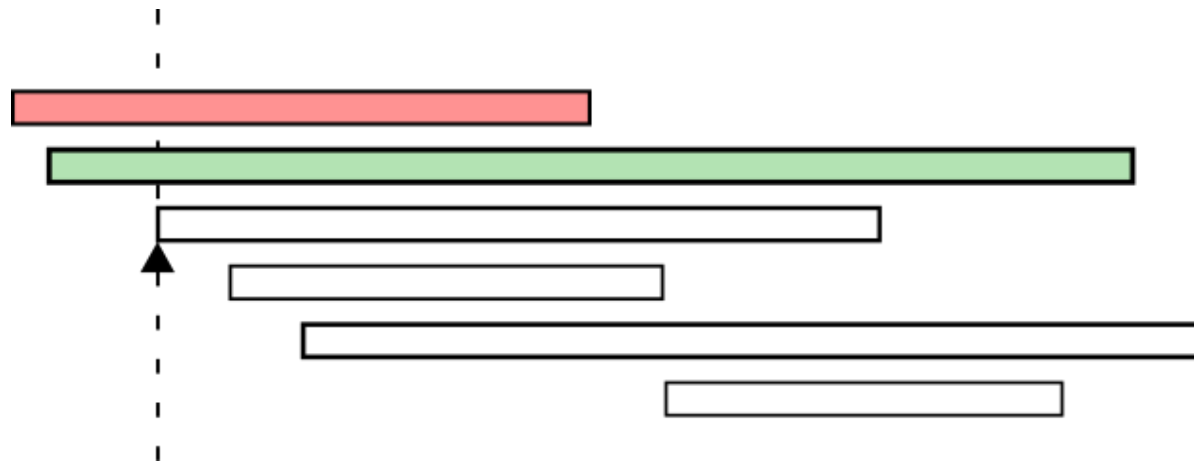
## SpillAtInterval(*i*)

**else**

```
register[i] ← a register removed from pool of  
free registers
```

add  $i$  to *active*, sorted by increasing end point





# Voorbeeld $k = 3$

## LinearScanRegisterAllocation

$$active \leftarrow \{\}$$

**foreach** live interval  $i$ , in order of increasing start point

## ExpireOldIntervals(*i*)

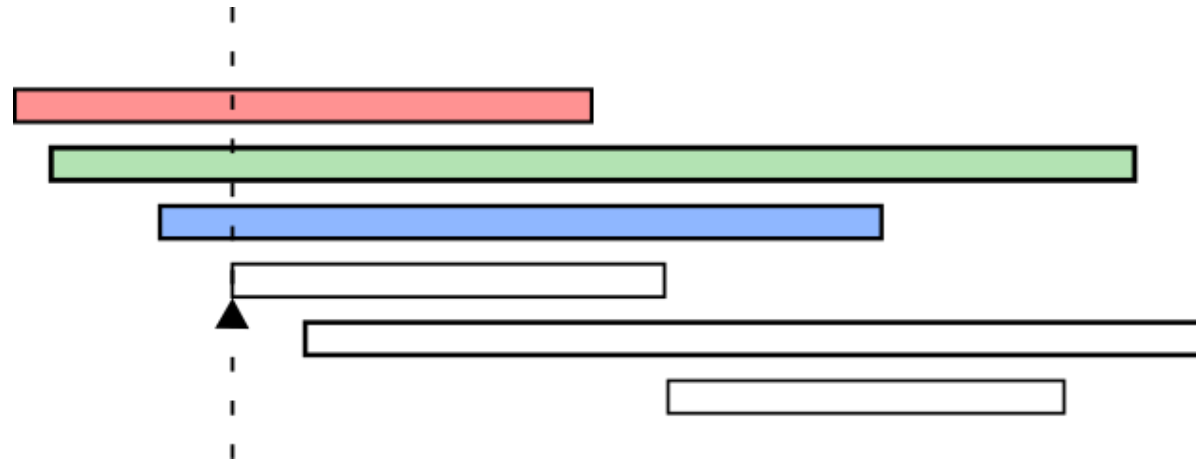
**if** length(*active*) = *k* **then**

## SpillAtInterval(*i*)

**else**

```
register[i] ← a register removed from pool of  
free registers
```

add  $i$  to *active*, sorted by increasing end point



# Voorbeeld $k = 3$

**SpillAtInterval( $i$ )**

$spill \leftarrow$  last interval in *active*

**if**  $endpoint[spill] > endpoint[i]$  **then**

$register[i] \leftarrow register[spill]$

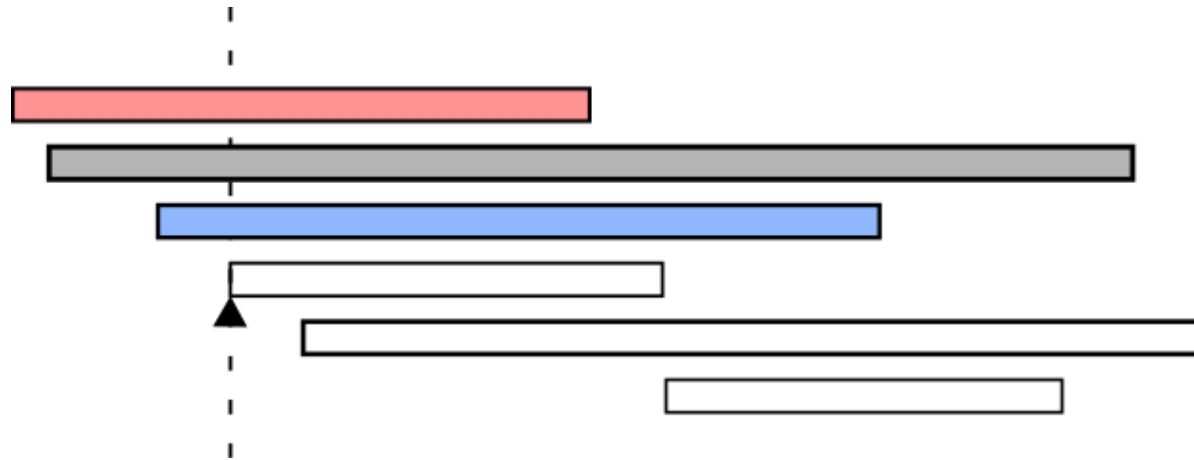
$location[spill] \leftarrow$  new stack location

    remove  $spill$  from *active*

    add  $i$  to *active*, sorted by increasing end point

**else**

$location[i] \leftarrow$  new stack location



# Voorbeeld $k = 3$

## LinearScanRegisterAllocation

$$active \leftarrow \{\}$$

**foreach** live interval  $i$ , in order of increasing start point

## ExpireOldIntervals(*i*)

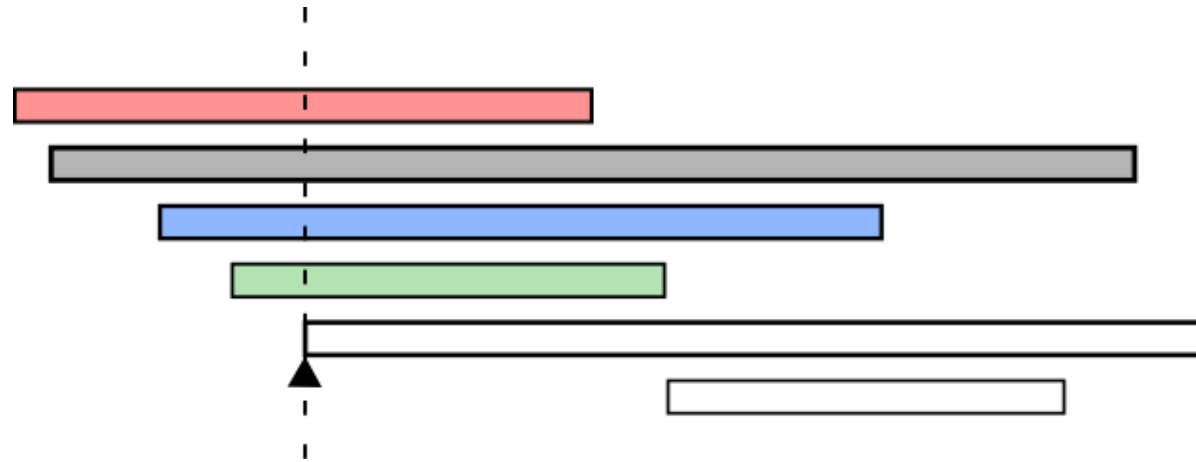
**if** length(*active*) = *k* **then**

## SpillAtInterval(*i*)

**else**

```
register[i] ← a register removed from pool of  
free registers
```

add  $i$  to *active*, sorted by increasing end point



# Voorbeeld $k = 3$

**SpillAtInterval( $i$ )**

$spill \leftarrow$  last interval in *active*

**if**  $endpoint[spill] > endpoint[i]$  **then**

$register[i] \leftarrow register[spill]$

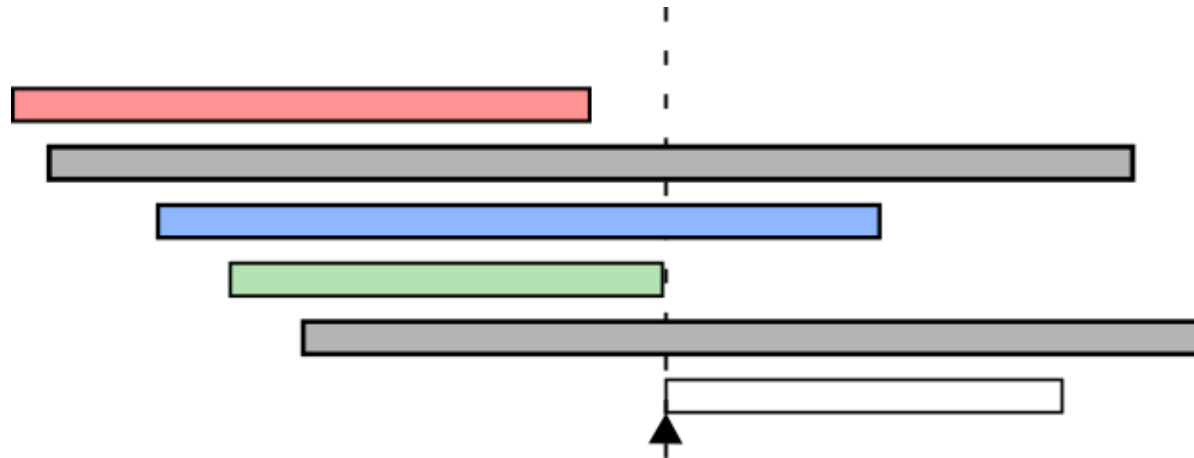
$location[spill] \leftarrow$  new stack location

    remove  $spill$  from *active*

    add  $i$  to *active*, sorted by increasing end point

**else**

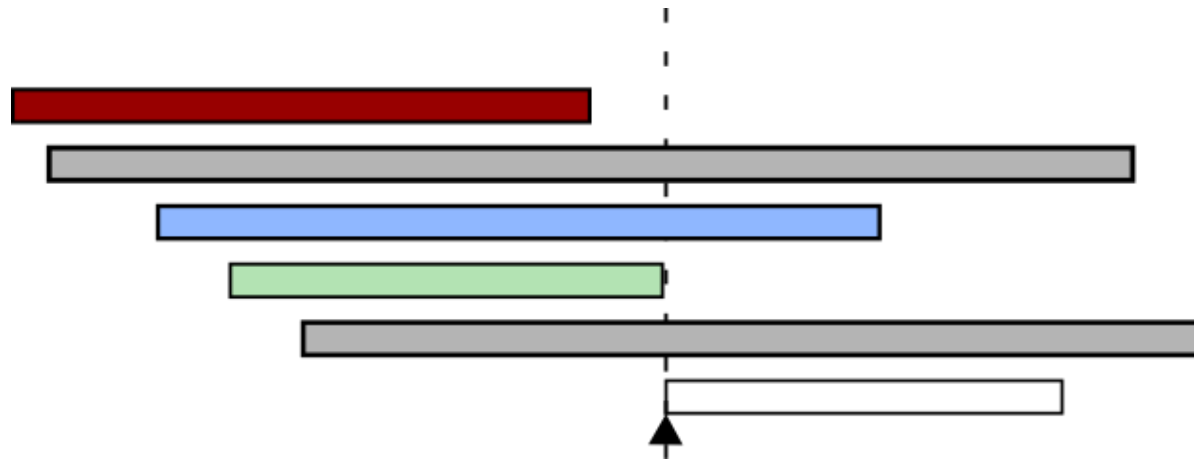
$location[i] \leftarrow$  new stack location



# Voorbeeld $k = 3$

**ExpireOldIntervals( $i$ )**

```
foreach interval  $j$  in active, in order of increasing end pc
  if  $endpoint[j] \geq startpoint[i]$  then
    return
  remove  $j$  from active
  add  $register[j]$  to pool of free registers
```

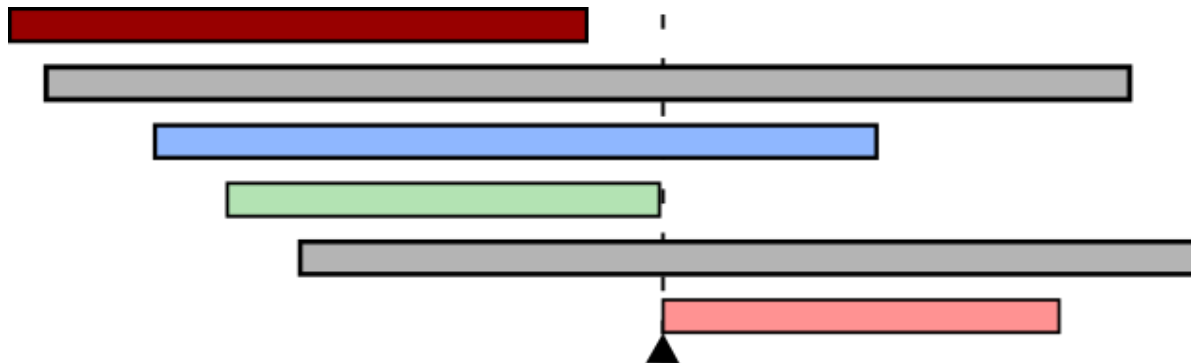




# Voorbeeld $k = 3$

## LinearScanRegisterAllocation

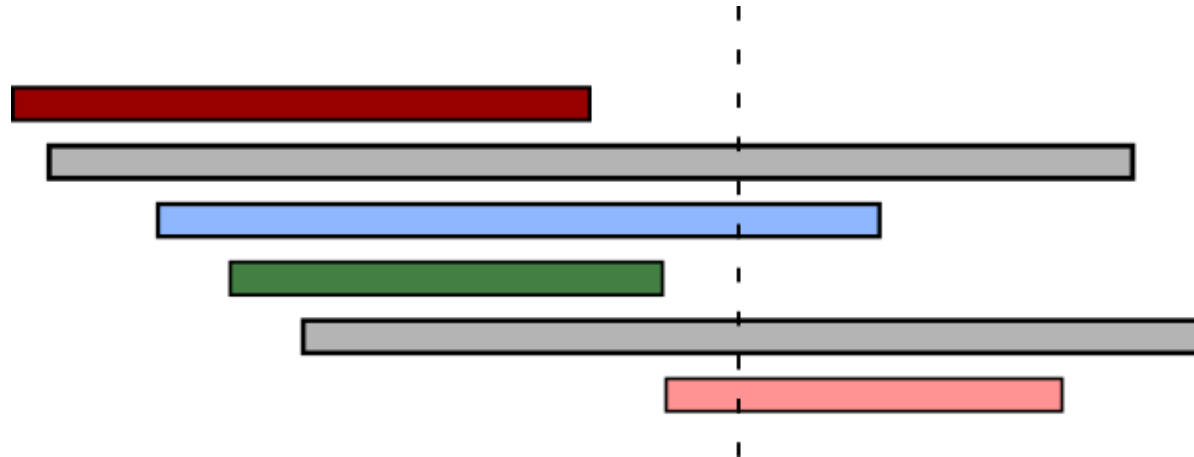
```
active  $\leftarrow \{\}$   
foreach live interval  $i$ , in order of increasing start point  
    ExpireOldIntervals( $i$ )  
    if length(active) =  $k$  then  
        SpillAtInterval( $i$ )  
    else  
         $register[i] \leftarrow$  a register removed from pool of  
            free registers  
        add  $i$  to active, sorted by increasing end point
```



# Voorbeeld $k = 3$

**ExpireOldIntervals( $i$ )**

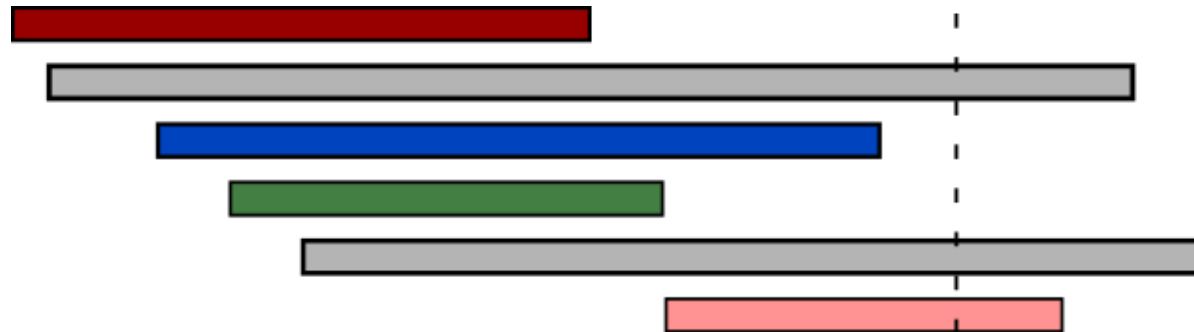
```
foreach interval  $j$  in active, in order of increasing end pc
  if  $endpoint[j] \geq startpoint[i]$  then
    return
  remove  $j$  from active
  add  $register[j]$  to pool of free registers
```



# Voorbeeld $k = 3$

**ExpireOldIntervals( $i$ )**

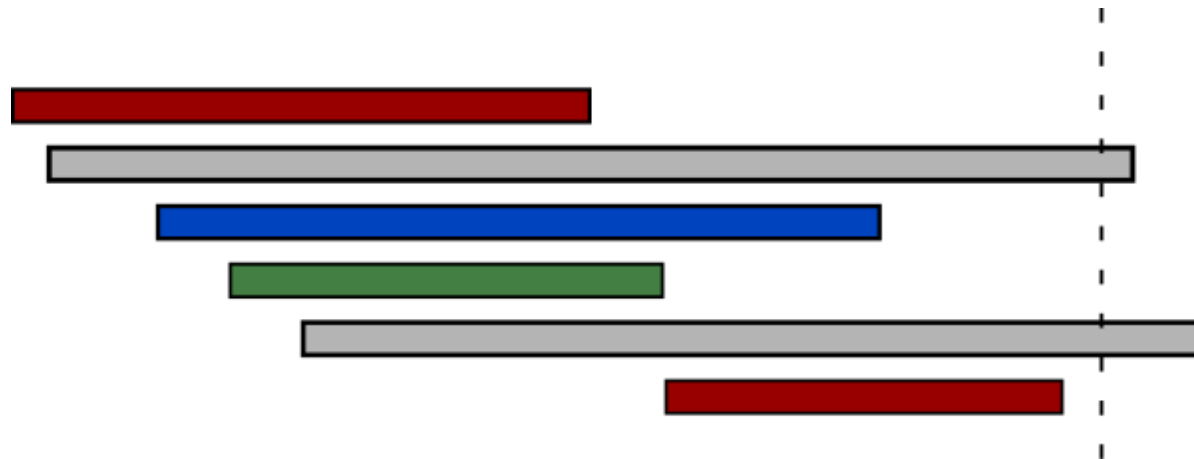
```
foreach interval  $j$  in active, in order of increasing end pc
  if  $endpoint[j] \geq startpoint[i]$  then
    return
  remove  $j$  from active
  add  $register[j]$  to pool of free registers
```



# Voorbeeld $k = 3$

**ExpireOldIntervals( $i$ )**

```
foreach interval  $j$  in active, in order of increasing end pc
  if  $endpoint[j] \geq startpoint[i]$  then
    return
  remove  $j$  from active
  add  $register[j]$  to pool of free registers
```



# Prestaties

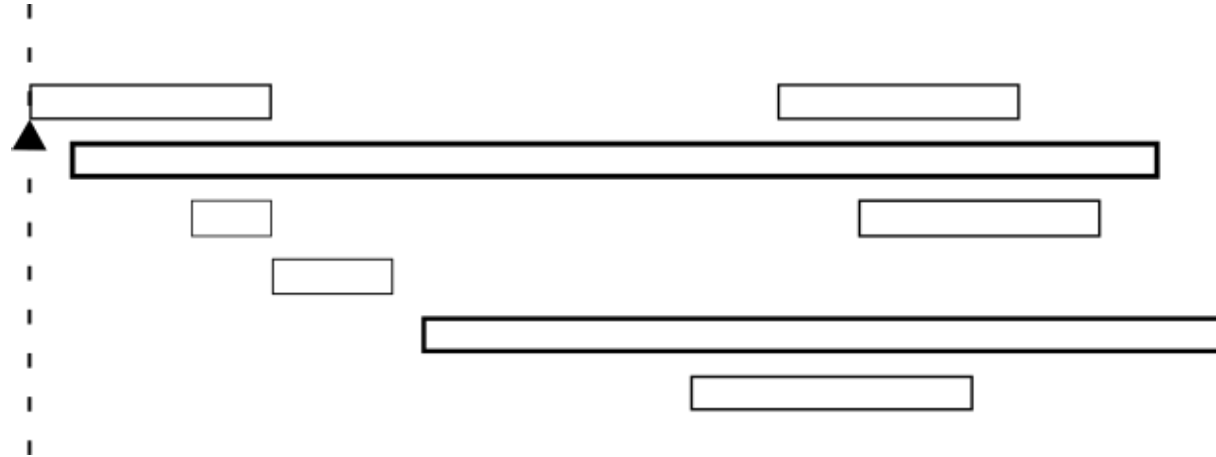
- Veel sneller dan grafenkleuring
- 12% tragere code dan grafenkleuring

# Second-chance Binpacking

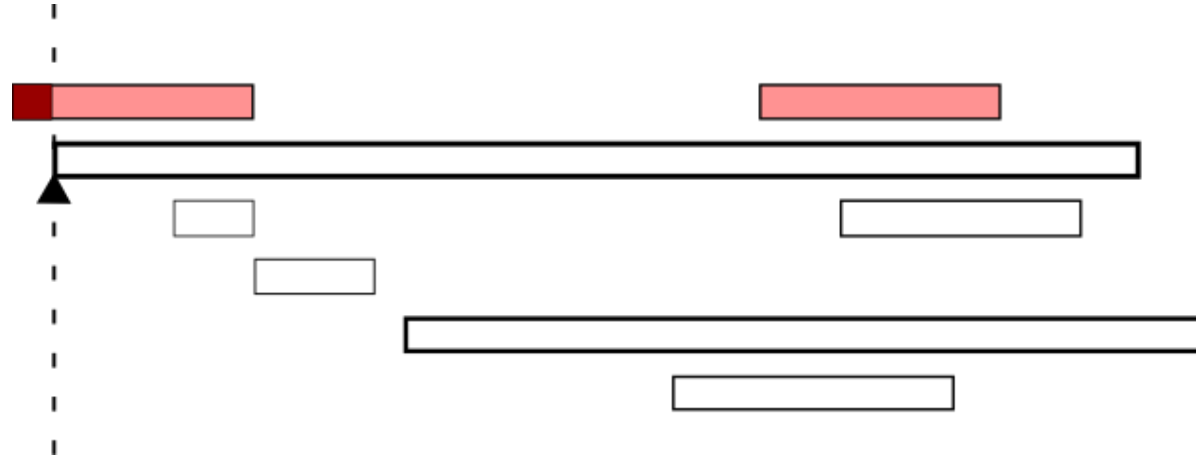
## Lifetime holes

- Periode in een live interval waar de opgeslagen waarde niet wordt gebruikt: bvb. tussen een load en een store
- Linear Scan houdt hier geen rekening mee

# Voorbeeld $k = 3$

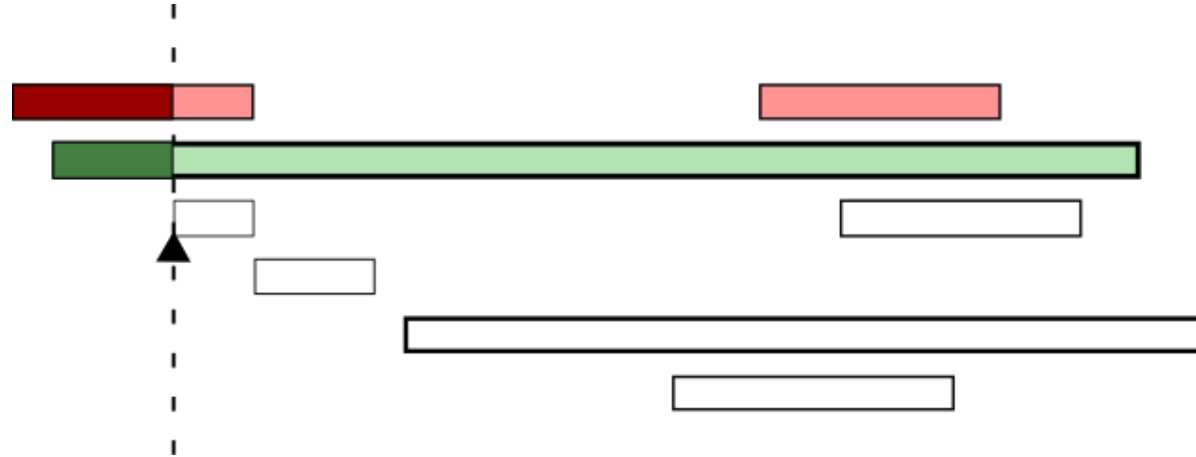


# Voorbeeld $k = 3$

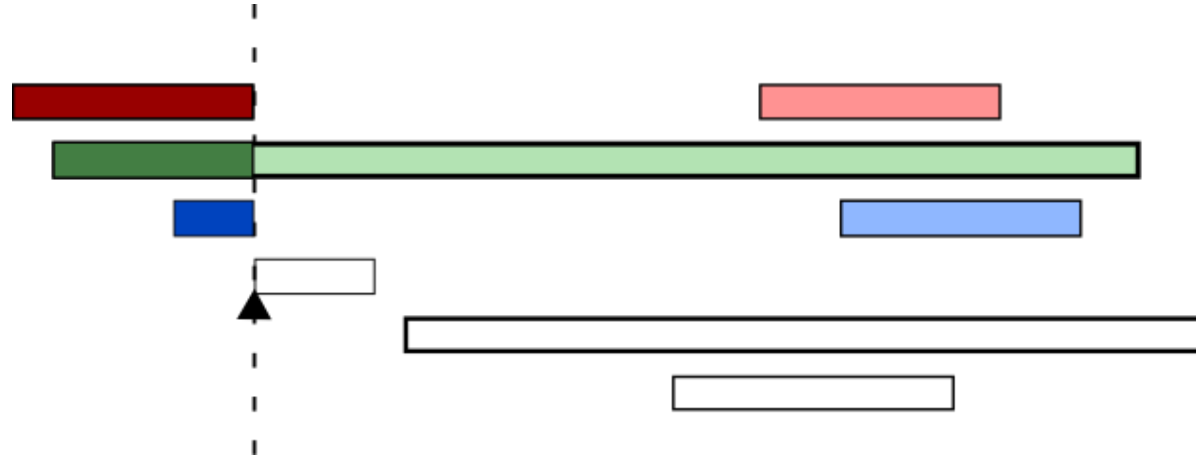




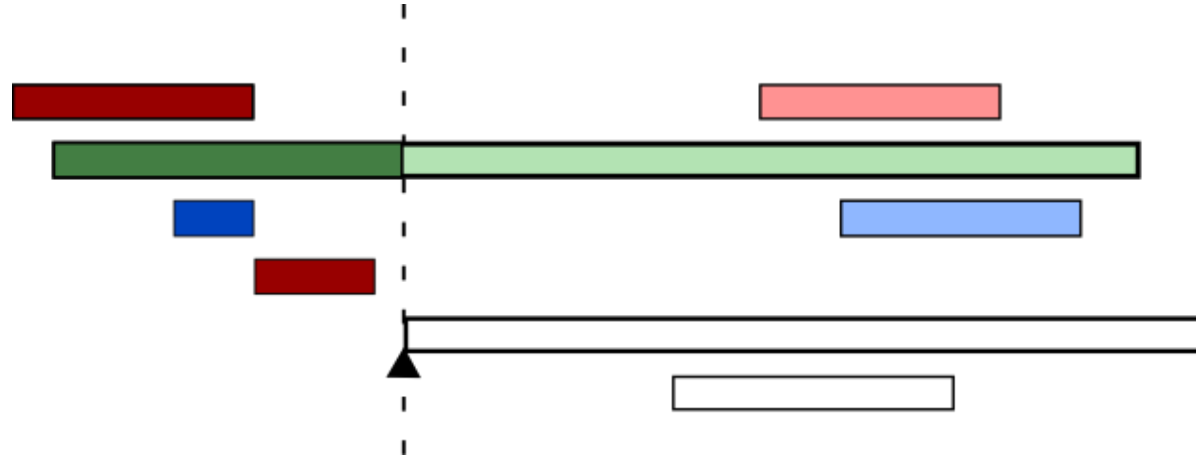
# Voorbeeld $k = 3$



# Voorbeeld $k = 3$



# Voorbeeld $k = 3$



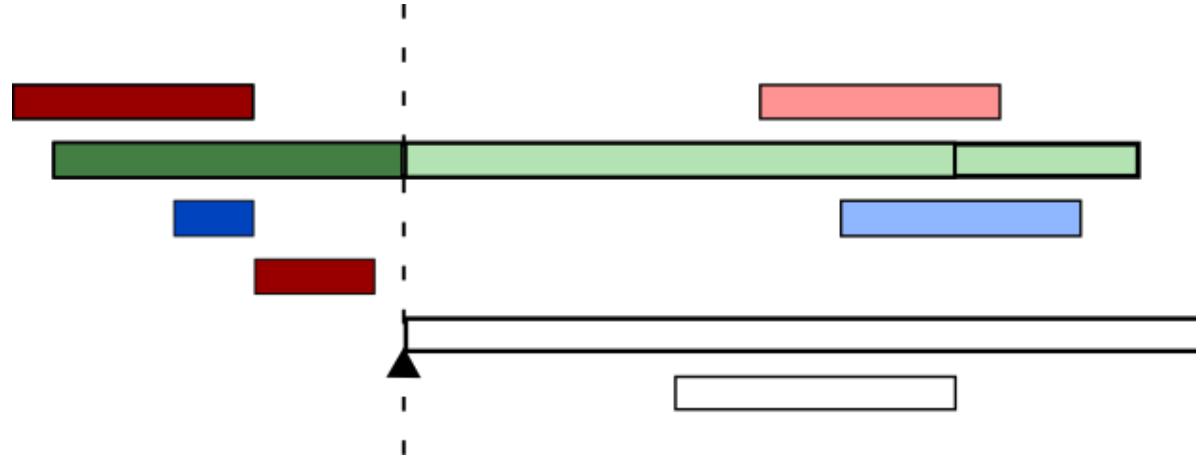
# Second-chance allocatie

- Bij linear scan wordt een waarde gespilled voor de rest van het live interval
- Nu splitsen we het op, voor en na het volgende gebruik
- En spillen tot aan het volgende gebruik
- Zo krijgt de gespilde waarde *opnieuw een kans* om toegewezen te worden aan een register

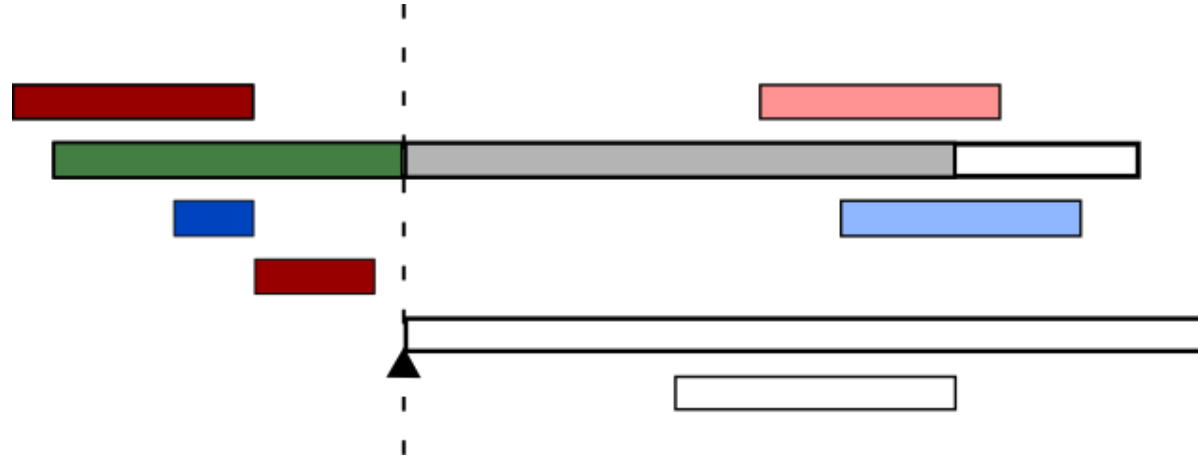
# Spilling heuristic

- Linear Scan: laatste eindpunt
- Second-chance Binpacking: Laatste volgende gebruik

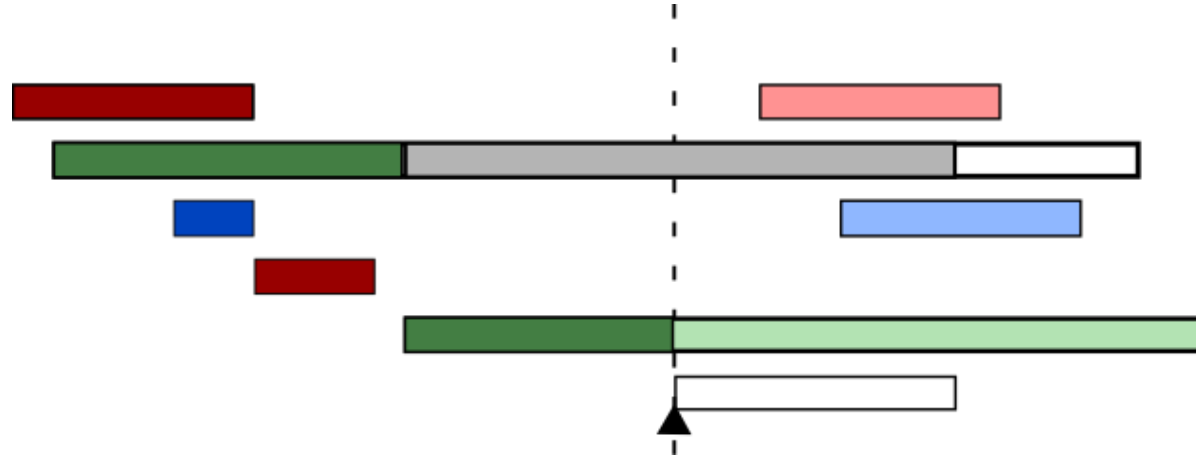
# Voorbeeld $k = 3$



# Voorbeeld $k = 3$

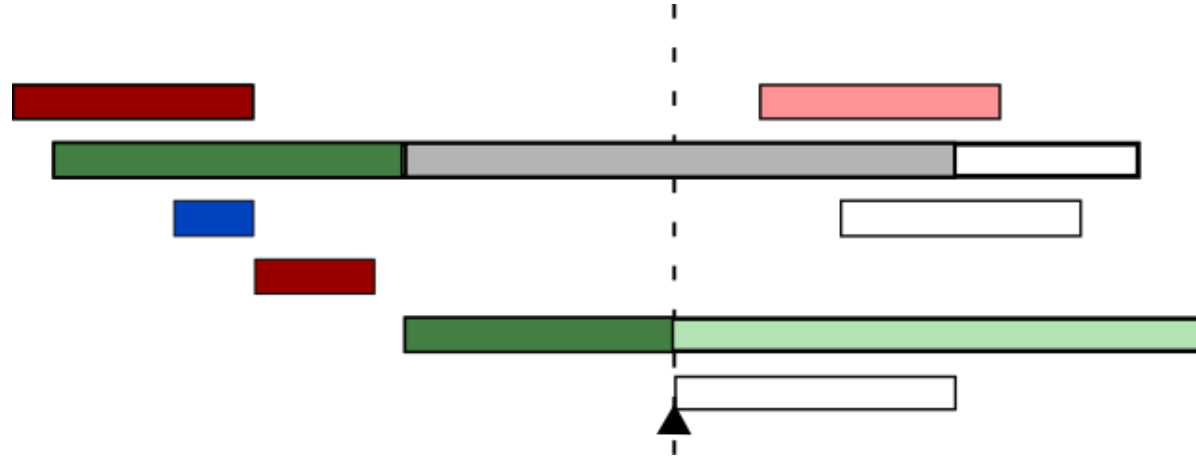


# Voorbeeld $k = 3$

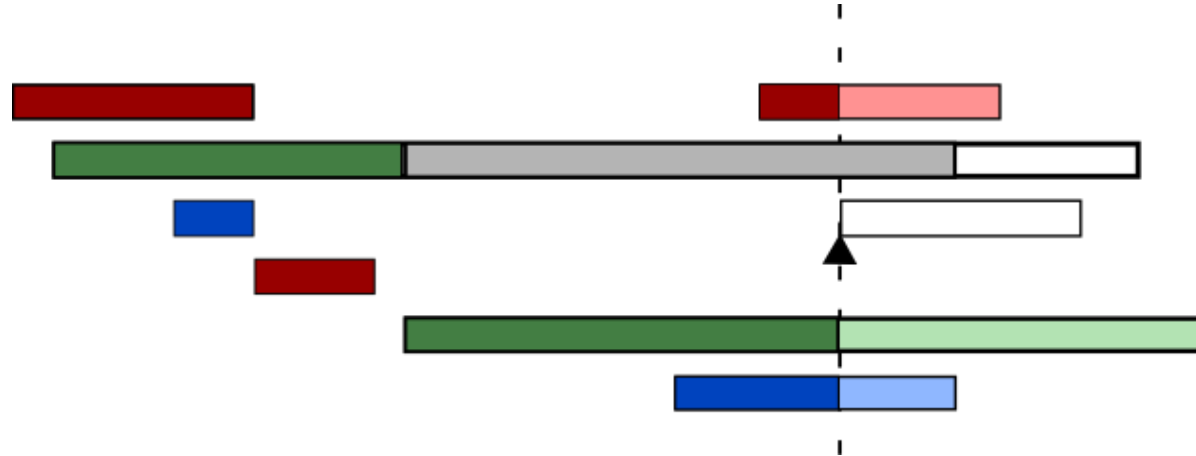




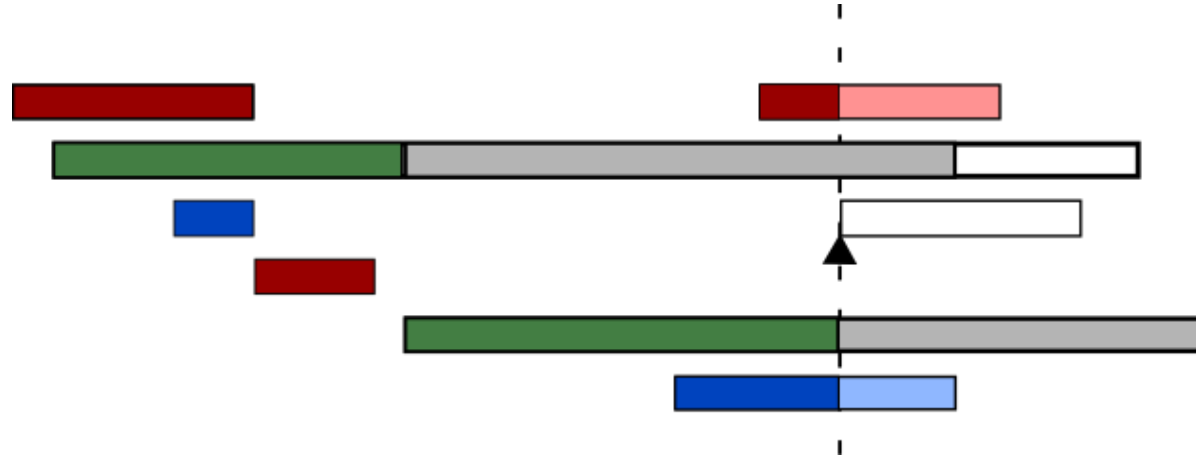
# Voorbeeld $k = 3$



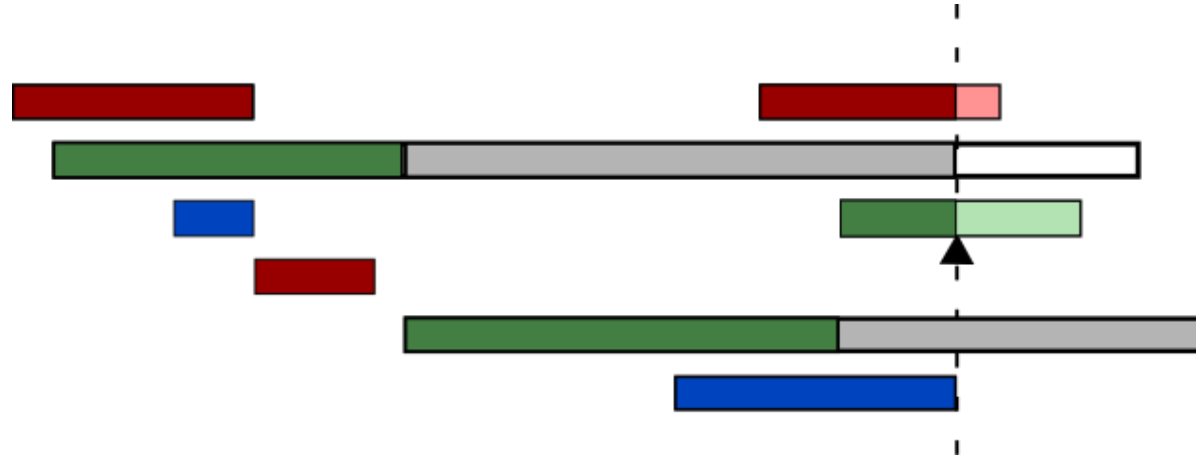
# Voorbeeld $k = 3$



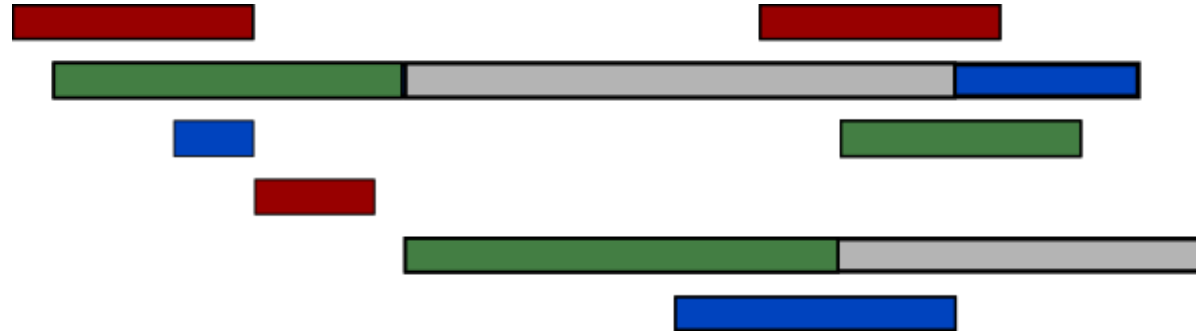
# Voorbeeld $k = 3$



# Voorbeeld $k = 3$



# Voorbeeld $k = 3$



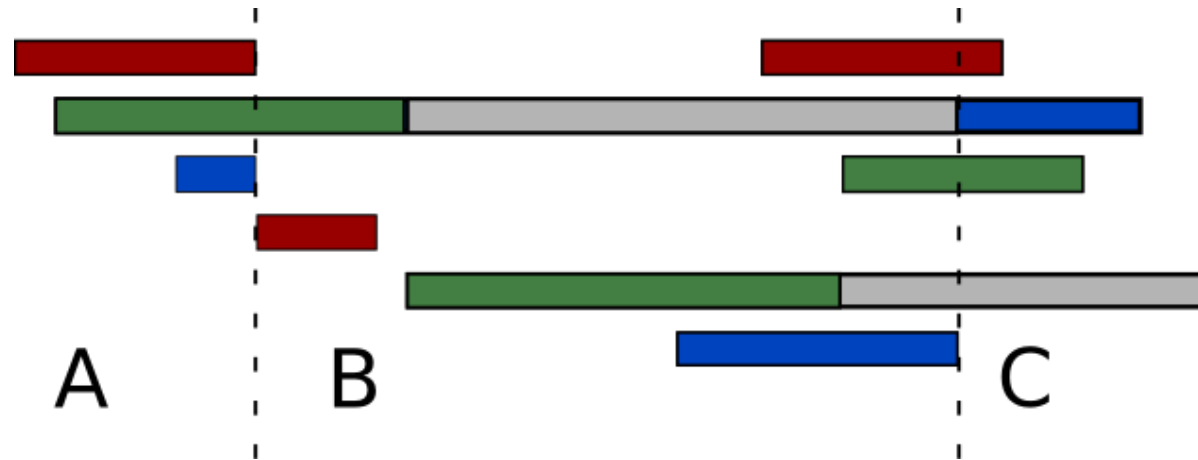
# Spill store eliminatie

- Waardes naar het geheugen spillen is duur, dus te vermijden
- Als een waarde eerder al eens gespilled is kan de waarde in het geheugen nog hetzelfde zijn
- Om hiervan gebruik te maken houden we bij welke plaatsen in het geheugen onaangeraakt blijven

# Resolutie

- Control flow is niet lineair (volgt de nummering niet)
- Op verschillende paden kunnen waarden op verschillende plaatsen opgeslagen zijn (register/spill of register1/register2)
- Dit lossen we op door moves toe te voegen waar nodig

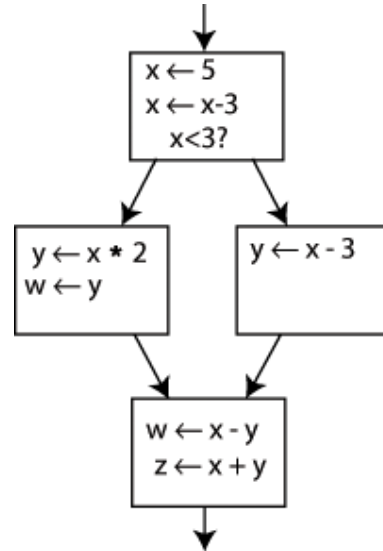
# Voorbeeld



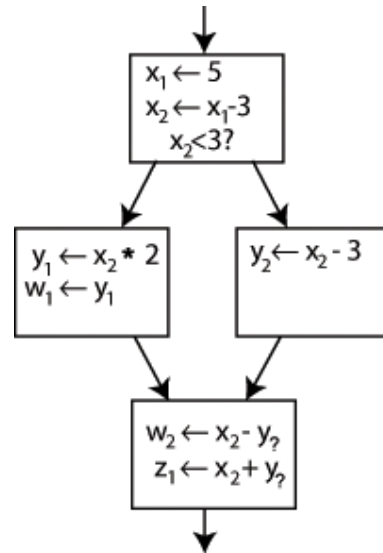
- $A \rightarrow C$ : groen naar blauw en blauw naar Groen
- $B \rightarrow C$ : eerste spill naar blauw



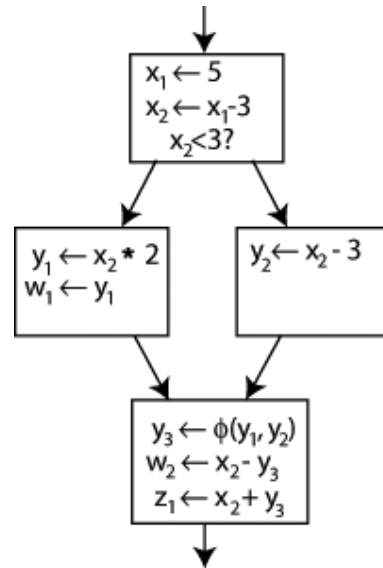
# Linear Scan en SSA Form



# SSA Form



# SSA Form



# Static single assignment form

- Elke temporary krijgt maar één keer een waarde
- Phi functies op plaatsen waar control flows samenkomen om de juiste waarde te kiezen
- Omdat phi functies een probleem vormen voor het bepalen van live intervallen voegen we moves toe

# Liveness analyse

- Verzamelingen van intervallen i.p.v. één live interval, voor de lifetime holes

# Coalesce temporaries

- Als de live intervallen van twee temporaries niet overlappen kunnen we ze samenvoegen
- Dit doen we voor bvb. de argumenten van phi functies

# Inactieve intervallen

- Actieve intervallen: live en in een register
- Inactieve intervallen: tijdens een lifetime hole maar in een register
- Inactieve intervallen worden apart bijgehouden

# Expiring old intervals

- Als het interval voorbij is, is het expired
- Als het interval een lifetime hole bereikt, wordt het naar de inactieve intervallen verplaatst



# Heractiveren van inactieve intervallen

- Als het inactieve interval ten einde is wordt het expired
- Als het lifetime hole gedaan is wordt het interval terug naar de actieve intervallen verplaatst

# Een vrij register alloceren

- Hetzelfde als bij linear scan
- Een register waaraan een inactief interval toegewezen is, is vrij als het interval dat we willen toewijzen in het lifetime hole van dat inactief interval past

# Een interval spillen

- Hetzelfde als bij linear scan
- Inactieve intervallen zijn ook spill kandidaten

# Resolutie

- Er worden geen intervallen gesplitst
- Resolutie is dus niet nodig

# Optimized Interval Splitting

## Een vrij register alloceren

- Op dezelfde manier als bij de SSA Form
- Registers met inactieve intervallen worden als vrij beschouwd maar dan moet het interval dat we eraan willen toewijzen gesplitst worden op het einde van het lifetime hole van het inactieve interval
- Omdat er gesplitst wordt moeten we opnieuw resolutie toepassen

# Optimale splits posities

- Second-chance binpacking splitst zo laat mogelijk
- Nu gebeuren splitsingen op de grenzen van basic blocks (buiten lussen)

# Linear Scan Conclusie

- State of the art voor JIT compilers
- In de eenvoudigste vorm heel makkelijk te implementeren
- Prestatie benadert grafenkleuring (12%)

# Alternatief

## *Lossy* Chaitin-Briggs

- Chaitin-Briggs grafenkleuring waarbij de interferentie-grafe incrementeel wordt aangepast i.p.v. deze volledig opnieuw op te stellen (hierdoor wordt deze minder nauwkeurig)
- Dit heeft als gevolg dat de allocatie minder optimaal is maar veel sneller kan gebeuren
- (Performantie in een JIT 9% beter dan Chaitin-Briggs, 7% beter dan linear scan)



# Referenties

[http://en.wikipedia.org/wiki/Just-in-time\\_compilation](http://en.wikipedia.org/wiki/Just-in-time_compilation)  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Register\\_allocation](http://en.wikipedia.org/wiki/Register_allocation)  
<http://cs.au.dk/~eernst/d0vsE13/materials/50b-kevin.pdf>  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Static\\_single\\_assignment\\_form](http://en.wikipedia.org/wiki/Static_single_assignment_form)  
<http://www.cs.ucla.edu/~palsberg/course/cs132/linearscan.pdf>  
<http://www.eecs.harvard.edu/hube/publications/pldi98-binpack.pdf>  
<ftp://ftp.ssw.uni-linz.ac.at/pub/Papers/Moe02.PDF>  
<http://llvm.org/pubs/2006-04-04-CG0-GraphColoring.pdf>

